

УДК 532:62.697

І.І. Пуховий

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕЖ БЕЗВІДРИВНОЇ І ВІДРИВНОЇ ТЕЧІЙ ПЛІВКИ РІДИНИ НА ЗОВНІШНІЙ ПОВЕРХНІ ОБЕРТОВОГО КОНУСА

The paper studies detachable and attachable flow limits of liquid film on the external surface of the rotating cone with different angles at the foundation (from 30 to 55 degrees) in the range from 41 to 173 s⁻¹ with the fluid flow up to 80,7 g/s. The film flow in the lift-off zone looks like radial convex streams, from which droplets are falling. The bulk of the liquid flame spray is formed. The angle cosine at the cone base influences the most the beginning of droplets falling from the film surface. Increasing the film thickness (liquid flow) and rising the speed can reduce the radius of droplets falling. Finally, we obtain the equations for calculating the initial radius of drops falling.

Вступ

Відомо, що процес тепло- і масообміну значно інтенсифікується під дією відцентрових сил, які виникають при течії рідини по обертових тілах [1–5]. У промисловості використовуються випарні апарати CentryTherm шведського виробництва для випаровування термочувливих та інших продуктів. Крім того, диски і конуси використовуються для розпилення рідини, причому краплі мають приблизно однакові розміри, що важливо для тепломасообмінних апаратів [3].

В літературі відоме використання конусів, занурених вершиною в рідину, що залита у ємність [3, 4]. В [3] досліджувалася диспергація рідини конусом, виготовленим з пористого абразивного матеріалу, який використовується в металообробці. Вода проникає через пори матеріалу, що дає змогу працювати з малими витратами рідини. Диспергація води з витратою до 0,28 г/с використовувалася для зволоження приміщень. Автори [4] дослідили висоту підняття рідини по конусу з радіусом лише 40 мм та кутом при основі 65°, зануреному вершиною в посудину з рідиною. Фіксувалася лише висота, на яку піднімалася рідина, що потім відірвалася відцентровими силами в одній площині (це видно на поданих фотознімках). Змінювати кількість витрати рідини автори могли лише зміною кількості обертів конуса.

Постановка задачі

У відомій нам літературі не знайдено даних про течію плівки рідини, якою рівномірно зрошується вершина конуса на його зовнішній поверхні потоком (потоками) з регульованою витратою. Метою дослідження є визначення

меж безвідривної та відривної течій і гідродинаміки плівки на обертовому конусі.

Експериментальна установка

Використовувався відцентровий апарат, в якому на підшипниках було встановлено вал і диск з отворами для кріплення конусів зовнішнім діаметром 400 мм [5]. До нього кріпилися конуси з різними кутами при основі. В цьому апараті було встановлено систему вимірювання радіусів (твірних конуса), при яких починається утворення крапель з плівки за рахунок дії відцентрових сил. Також оцінювався масштабною лінійкою через лупу розмір крапель, що осідали на поверхні паперу, який розміщувався паралельно твірній конуса на відстані 10–20 мм. В апараті було встановлено точні, градуировані ротаметри для фіксації витрати рідин (розчини гліцерину, поверхнево-активних речовин (ПАР), вода різної температури). Розчини гліцерину використовувались для виявлення впливу в'язкості, а розчини ПАР – для аналізу впливу поверхневого натягу. Оберти регулювалися зміною напруги в двигуні постійного струму, і кутова швидкість не перевищувала $\omega = 178 \text{ c}^{-1}$.

Гідродинамічна картина течії рідини

Було помічено візуально та за допомогою фотографування при стробоскопічному освітленні (стробоскоп автоматично відслідковував зміну кількості обертів), що початку відривання крапель (на фото їх не видно) від поверхні плівки передують перебудова хвильової течії на поверхні диска. Якщо при малих радіусах конусів плівка тече з характерними хвилями, концентричними осі обертання, то зі збіль-

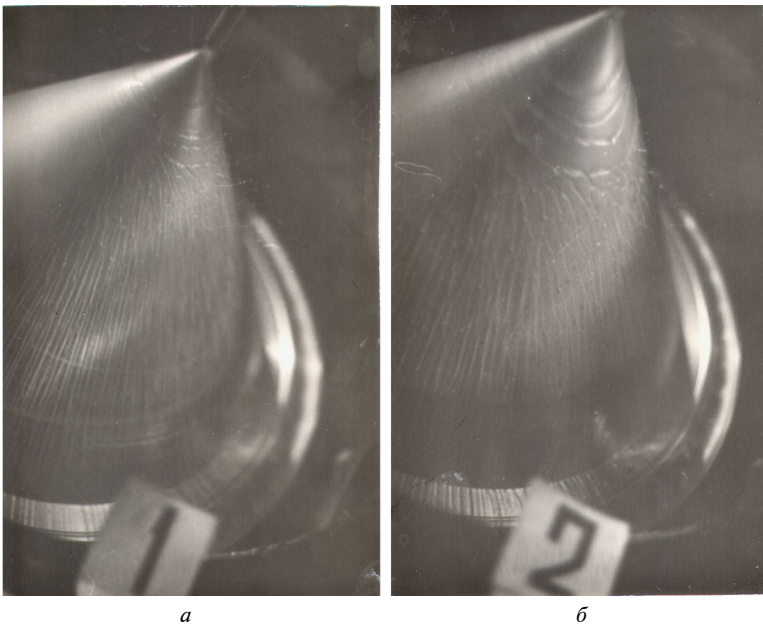


Рис. 1. Течія розчину гліцерину у воді (масова концентрація 70 % по конусу з кутом при основі $\beta = 55^\circ$, витрата рідини – 17,2 г/с: *a* – швидкість обертання 146 с^{-1} ; *b* – швидкість обертання $73,2 \text{ с}^{-1}$

шенням радіусів рідина рухається з випуклими гребнями (рівчачками) вздовж твірної конуса, трохи відхиляючись від неї в сторону, протилежну напрямку обертання, що зумовлено тертям об повітря та іншими факторами. Гребені поступово розділяються на два або три рівчачки випуклої форми, які або знову розщеплюються, або зливаються між собою, що було особливо добре видно на фото для 70 %-ного розчину гліцерину на конусі з кутом при основі $\beta = 55^\circ$ (див. рис. 1).

Краплі відриваються від поверхні випуклих рідинних рівчачків, що рухаються поверхнею конуса вздовж його твірної. При невеликих витратах рідини і невеликих швидкостях обертання ω рівчачки майже не відхиляються від напрямку твірних конуса. Відхилення стає помітним зі зростанням вказаних величин: збільшення витрат рідини призводить до потовщення плівки, а зростання швидкості обертання збільшує сили тертя рідини об повітря. Під час течії розчину поверхнево-активних речовин з коефіцієнтом поверхневого натягу $\sigma = (30\text{--}37) \cdot 10^{-3} \text{ н/м}$ утворюється піна, і тому відхилення потоку від напрямку вздовж твірної конуса є більш істотним через бульбашки піни, які значно виступають над поверхнею плівки. Течія води схожа на течію розчину гліцерину у воді з концентрацією 70 % ($\mu = 18,4 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$).

Виявлено, що при однаковій витраті рідини, але різних швидкостях обертання збіль-

шення ω призводить до зменшення відстані між концентричними рваними хвилями, які мають місце в безвідривній зоні течії. Зазначимо, що між рівчачками, які рухаються вздовж твірних конуса в зоні відривання крапель, є тонка плівка рідини, а відрив крапель відбувається по всій довжині направлених до периферії рівчачків.

Таким чином, при рівномірній подачі рідини на зовнішній поверхні обертового конуса можна отримати при швидкостях обертання більше $150\text{--}200 \text{ с}^{-1}$, об'ємний "факел" крапель, які зриваються з випуклих рівчачків від початку переформування плівкової безвідривної течії рідини до нижньої широкої частини конуса. В цьому випадку будемо мати велику поверхню тепломасообміну у вигляді поверхні крапель, що рухаються, відриваючись від плівки

відцентровими силами, а витрата рідини може бути на 1-2 порядки вищою, ніж у [3].

Конус може розміщуватися в просторі довільно (як з вертикальною, так і з горизонтальною віссю обертання і з розміщенням широкої частини конуса зверху або знизу). Умовою для отримання ефекту рівномірного відриву крапель по периферії конуса також є рівномірна подача рідини по поверхні.

При подачі рідини одним соплом на деякий радіус, більший $0,01\text{--}0,02 \text{ м}$, безпосередньо біля сопла, де плівка товста, краплі починають відриватися від неї. Одразу ж після потрапляння на поверхню конуса з товстого валка, який утворюється при живленні одним соплом, відриваються великі краплі. Потім при зменшенні витрати через втрачену частину потоку і збільшення радіуса (менша щільність зрощення) плівка розподіляється по конусу рівномірніше. З протилежної соплу сторони конуса характер течії стає схожим на той, який спостерігався при рівномірній подачі рідини. Отже, чим товстіша плівка, тим більша ймовірність її відриву від поверхні конуса при однакових значеннях ω .

На конусі з кутом при основі $\beta = 30^\circ$ рідина подавалася в центр, який мав форму невеликого диска з радіусом близько 20 мм . Зрив рідини при переході з диска на поверхню конуса не відбувався, оскільки радіус R диска невеликий. Із зменшенням β зона безвідривного

руху збільшується. Зазначимо, при зростанні витрати рідини відривання крапель починається при однакових швидкостях обертання на менших радіусах внаслідок збільшення товщини плівки і висоти рівчачків, з яких формуються краплі. Діаметри крапель збільшуються і при малих витратах становлять близько 0,4 мм, а при великих – близько 0,5 мм. Спеціального дослідження діаметру крапель з розподілом їх за розмірами для всього конуса не проводилось.

При зниженні поверхневого натягу додаванням ПАР діаметр крапель зменшувався, що є логічним, оскільки при відриванні крапель від плівки вони мають перебороти силу поверхневого натягу. Швидкість обертання в досліді була 146 с^{-1} , а витрата рідини становила $45,2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$. Малий поверхневий натяг призводив до утворення піни, і на неї повітряний потік діяв сильніше, значно відхиляючи від твірної конуса рівчачки та гребені на плівці.

Результати дослідження

Залежність величини радіуса, при якому починається відрив крапель, від кутової швидкості для різних конусів показано на рис. 2 для води при температурі 50°C . Вплив в'язкості видно з рис. 3, де наведено дослідні результати для води і розчину гліцерину з концентрацією 75,5%. Зазначимо, що в розчині гліцерину коефіцієнт поверхневого натягу менший, ніж у води.

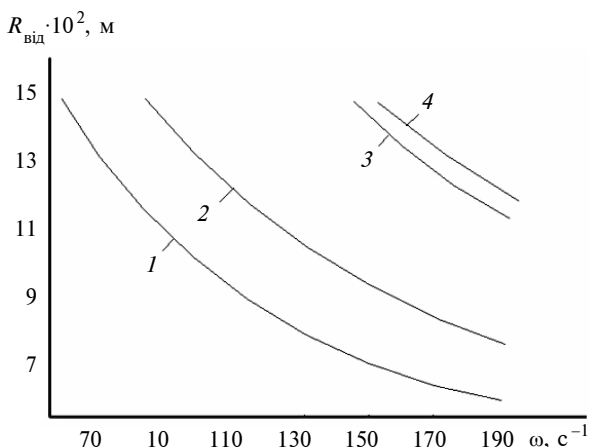


Рис. 2. Залежність радіуса початку відриву крапель води з поверхні обертового конуса від швидкості обертання та витрати води при температурі 50°C : 1 – $\beta = 55^\circ$; $m_B = 80,7 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$; 2 – $\beta = 45^\circ$; $m_B = 80,7 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$; 3 – $\beta = 45^\circ$; $m_B = 24,7 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$; 4 – $\beta = 30^\circ$; $m_B = 80,7 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$

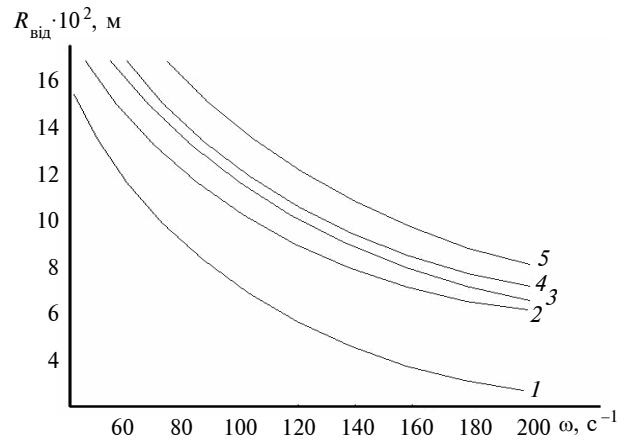


Рис. 3. Залежність радіуса початку відриву крапель з водних розчинів гліцерину та води, що рухаються в плівці по зовнішній поверхні обертових конусів, від швидкості обертання та витрати рідини; конус з кутом при основі $\beta = 55^\circ$: 1 – водний розчин гліцерину концентрацією 75,5%, $m_B = 4,2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$, $t = 15^\circ\text{C}$; 2 – вода, $t = 50^\circ\text{C}$, $m_B = 80,7 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$; 3 – вода, $t = 15^\circ\text{C}$, $m_B = 80,7 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$; конус з кутом при основі $\beta = 30^\circ$: 4 – вода, $t = 20^\circ\text{C}$, $m_B = 50,0 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$; 5 – вода, $t = 20^\circ\text{C}$, $m_B = 10 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$

У зоні, розміщеній зліва під лініями рисунків, існує безвідривна течія плівки по конусу, а вище, справа від лінії, – зона, де краплі відриваються від плівки.

При контакті з холодним повітрям рідина буде охолоджуватися при невеликих витратах і швидкостях обертання лише в плівці, а зі збільшенням ω і m_B – як у плівці, так і в краплях. В подальшому потрібно дослідити кількість рідини, що відривається краплями і рухається до більшої основи конуса.

Аналіз результатів дослідження. Розглядаючи задачу формування крапель з плівки, що тече по зовнішній поверхні конуса, слід зазначити, що відцентрова сила, яка відриває краплю, може бути знайдена за формулою

$$F_{\text{від}} = \rho V \cdot \omega^2 R_{\text{від}} \cdot \sin \beta, \quad (1)$$

де $V = \frac{\pi d_k^3}{6}$ – об'єм краплі; $R_{\text{від}}$ – радіус відриву; β – кут при основі конуса.

При $\omega > 40 \text{ с}^{-1}$ силою гравітації можна знехтувати.

Сила, що протидіє відцентровій силі і утримує краплю, становить

$$F_{\text{утв}} = \sigma \pi d_k. \quad (2)$$

Маючи дослідні дані по радіусу відриву $R_{\text{від}}$, знайдемо діаметр краплі, прирівнявши формули (1) і (2), й отримаємо

$$d_k = \sqrt{\frac{6\sigma}{\rho\omega^2 R_{\text{від}} \sin \beta}}.$$

Вода з температурою 20 °С має густину $\rho = 988,2 \text{ кг/м}^3$ і коефіцієнт поверхневого натягу $\sigma = 72,7 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$. Конус мав кут 55°, відповідно $\sin 55^\circ = 0,82$. Для швидкості обертання більшості асинхронних електродвигунів $\omega = 146 \text{ с}^{-1}$ при $R_{\text{від}} = 0,075 \text{ м}$ і $m_b = 80,7 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$ розрахований діаметр становить 0,58 мм; при $R_{\text{від}} = 0,14 \text{ м}$ і $m_b = 24 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$ діаметр становить 0,42 мм.

При течії розчину ПАР з $\sigma = 31,2 \cdot 10^{-3}$ і витратою води $m_b = 45,2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$ діаметр становить 0,479 мм. Як бачимо, майже при однакових радіусах (0,075 і 0,068 м) для першого і третього розрахунків краплі менші в розчину ПАР.

За розрахунками діаметр крапель лежить у діапазоні близько 500–600 мкм. Проведені вимірювання дають близьку до розрахункових значень величину діаметра краплі $d_k = 400\text{--}500 \text{ мкм}$. Витрата рідини збільшує приблизно на 20 % діаметр краплі при зростанні m_b більше, ніж в 3 рази (3,36 рази). Товщина плівки залежить від витрати рідини в степені 1/3. Кубічний корінь з 3,36 дорівнює 1,49. Якби діаметр крапель зростав пропорційно товщині плівки, то він збільшився б майже у 1,5 рази при рівних радіусах. Але у другому розрахунку радіус був у $0,135/0,075 = 1,8$ рази більший, тому товщина плівки в другому випадку була меншою в 0,678 рази.

Поділивши 1,5 на 0,678 отримаємо, що плівка у другому випадку була тонша в 2,31 рази. Таким чином, діаметр краплі дуже слабо залежить від товщини плівки. Для перевірки реальних діаметрів крапель потрібні додаткові дослідження відриву крапель на обертаних конусах, зокрема і залежності від радіуса.

Щоб узагальнити експериментальні результати для води і ПАР на різних конусах, ми знайшли залежність $Re_{\text{від}} = f(We, \cos \beta)$ і отримали рівняння

$$Re_{\text{від}} = 9,2 \cdot 10^7 We (\cos \beta)^3, \quad (3)$$

де $Re_{\text{від}} = \Gamma_{\text{від}}/\nu\rho$; $\Gamma_{\text{від}} = m_b^{\text{від}}/2\pi R_{\text{від}}$; $R_{\text{від}} = L \cdot \cos \beta$; $We = \sigma/\rho\omega^2 R_{\text{від}}$; L – довжина твірної конуса, $\Gamma_{\text{від}}$ – щільність зрошування.

Залежність (3) з точністю $\pm 30\%$ узагальнює результати дослідів визначення початкового радіусу відривання крапель.

Відзначимо істотну роль косинуса кута при основі конуса в рівнянні (3). Саме він найбільше впливає (в 3 степені) на витрату рідини, після якої починається відривання крапель на заданому радіусі при відомому значенні ω і фізичних константах рідини. Це пояснюється істотним збільшенням величини вектора відцентрової сили, що відриває краплі з поверхні випуклих частин плівки. Відповідно, вектор відцентрової сили, направлений вздовж твірної конуса, зменшується, і товщина плівки рідини дещо зростає.

В розгорнутому вигляді рівняння (3) матиме такий вигляд:

$$m_b^{\text{від}} = 9,2 \cdot 10^7 \frac{\sigma \cos^3 \beta \nu \rho}{\rho \omega^2 R^2}.$$

Радіус початку відриву крапель при заданих m_b і ω можна знайти з рівняння

$$R_{\text{від}} = \sqrt{\frac{9,2 \cdot 10^{-7} \sigma \cos^3 \beta \nu \rho}{\rho \omega^2 m_b}}.$$

Зазначимо, що результати дослідів з розчином гліцерину у воді не узагальнюються рівнянням (3).

Для безвідривного входу рідини при подачі її не в центр конуса, а на деякі початкові радіуси R_p , потрібно забезпечити рівномірне підведення рідини соплами або іншими пристроями по периметру конуса. Відцентрові випарні апарати фірми "Alfa Laval" CentryTherm використовують для нагрівання і випаровування рідин лише внутрішні поверхні конусів. Виконані дослідження дали змогу знайти зону безвідривного потоку на зовнішній стороні конуса, і з використанням цих досліджень апарати фірми "Alfa Laval" можуть також термічно обробляти рідину на зовнішніх поверхнях конусів, підвищивши в два рази свою продуктивність при незмінних розмірах. Отримано патенти СРСР, Франції та Швеції на апарат з безвідривним рухом оброблюваної рідини [6–8].

Висновки

1. Диспергація обертовим конусом при отриманні об'ємного факела розпилу можлива за витрати води більше $(90-100) \cdot 10^{-3}$ кг/с, що становить 300–360 кг/год. Для невеликих витрат зручніше користуватися обертовим диском, який легше виготовити.

2. Найбільший вплив (в 3 степені) на радіус відривання крапель має косинус кута при основі конуса.

3. Отримані узагальнені рівняння та проведений теоретичний аналіз підтверджують

вплив поверхневого натягу рідини, її в'язкості та параметрів процесу на початкову зону відривання крапель.

4. На основі досліджень запропоновано і запатентовано в різних країнах конструкцію теплообмінного апарата з безвідривним рухом рідини на зовнішній поверхні обертового конуса.

5. В подальшому потрібно провести дослідження точного розміру крапель, що відриваються, і узагальнити експериментальні дані для рідин з різними теплофізичними властивостями.

1. *Бутузов А.И., Пуховой И.И., Риферт В.Г.* Экспериментальное исследование минимальной плотности орошения в центробежном тонкопленочном аппарате // Теплофизика и теплотехника. – К.: Наук. думка, 1973. – Вып. 24. – С. 18–22.
2. *Бутузов А.И., Пуховой И.И.* О режимах течения пленки жидкости по вращающейся поверхности // Инженерно-физический журнал. – 1976. – 31, № 2. – С. 24–30.
3. *Посохин В.Н., Софиуллин Р.Г.* Перспективные конструкции увлажнителей воздуха на основе пористых вращающихся распылителей // АВОК. – 2005. – № 3. – С. 21–23.
4. *Takahro Aoachi, Naona Sato, Naoto Koban, Toshihiro Hon.* Liquid Film Flow Rising the outer Surface of the Rotating Cone. // Trans. ASME. – 2010. – Ser. B, N 76. – P.161–163.
5. *Пуховой И.И.* Исследование минимальной плотности орошения и теплоотдачи при парообразовании в пленке жидкости на вращающемся диске: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – К., 1973. – 26 с.
6. Выпарной аппарат: А/С / *Пуховой И.И., Алабовский А.Н., Янчук Б.М.* – № 954095, кл. В 01D 1/22? F28 D 11/00; опубл. 30.08.1982; Бюл. № 32.
7. *Appareil d'échange thermique a film liquide:* Патент Франції / *Пуховий І.І., Алабовський О.М., Янчук Б.М.* – № 8110231; опубл. 1983; Бюл. № 16.
8. *Centrifugal film varmeaxlar.* Патент Швеції / *Пуховий І.І., Алабовський О.М., Янчук Б.М.* – № 445950; опубл. 1986; Бюл. 66.

Рекомендована Радою
Механіко-машинобудівного інституту
НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції
16 грудня 2010 року